

多数の近接した無線 LAN における コンテキストウェアなマルチレート制御による通信品質向上

熊谷菜津美[†] 磯村 美友[†] 村瀬 勉^{††} 小口 正人[†]

[†] お茶の水女子大学 〒112-8610 東京都文京区大塚 2-1-1

^{††} NEC 〒211-8666 神奈川県川崎市中原区下沼部 1753

E-mail: [†]{natsumi,mitomo}@ogl.is.ocha.ac.jp, ^{††}t-murase@ap.jp.nec.com, ^{†††}oguchi@computer.org

あらまし 近年、モバイルルータやテザリングなど移動無線 LAN システムが増加している。このことから、従来の想定以上の多くの無線 LAN システムが近距離にひしめき、通信品質劣化が懸念される。従来、多くの固定無線 LAN がお互いに干渉する場合に関しては、マルチレートにおける適応レート制御が必須であった。しかしながら、移動無線 LAN システムでは、AP と端末の距離が非常に近いというような状況（コンテキスト）の違いから、従来の適応レート制御が逆に通信品質を劣化させる原因となり得る。さらに、多数の無線 LAN が近接する状況では、1 つの通信帯域を共有することになるため、1 つの無線 LAN において通信品質が劣化すると、他の全ての無線 LAN の通信品質も劣化してしまうという、連鎖反応にも似た状況になり、非常に大きな問題になる。そこで、本研究では、コンテキストに応じた適応レート制御を提案し、その効果を評価した。評価結果は、提案するコンテキストウェアな制御により、通信品質が大きく改善したことを示している。

キーワード 無線 LAN, 通信品質, QoS, 干渉

QoS Improvement with Context Aware Multi Rate Control in Densely Deployed Wireless LANs

Natsumi KUMATANI[†], Mitomo ISOMURA[†], Tutomu MURASE^{††}, and Masato OGUCHI[†]

[†] Ochanomizu University Otsuka 2-1-1, Bunkyo-Ku, Tokyo 112-8610 Japan

^{††} NEC Corporation

1753 Shimonumabe, Nakahara-ku, Kawasaki, Kanagawa, 211-8666, Japan

E-mail: [†]{natsumi,mitomo}@ogl.is.ocha.ac.jp, ^{††}t-murase@ap.jp.nec.com, ^{†††}oguchi@computer.org

1. はじめに

インターネットのインフラ化に伴い、あらゆる地域・場所でネットワークに接続することが求められるようになってきた。また、リッチコンテンツの増加や動画などマルチメディア通信の増加などからブロードバンド通信が強く求められてきている。さらに、通信端末の主体がスマートフォンやタブレットで代表されるモバイルワイヤレス端末に移行しつつある。このような社会的背景から、移動体ブロードバンド通信技術への期待が高まっている。これまでの無線 LAN 技術は、AP (Access Point) と端末が一体となった移動アドホックネットワーク (MANET [1]) においては、AP が移動するということが考えられているが、それ以外では、端末は移動するが、AP は固定であるという前提での議論が多かった。

しかしながら、近年モバイル AP やテザリング機能などを用いた移動無線 LAN システムが非常に勢いで増加している。モバイル AP とは、インターネットとの接続には 3G や WiMAX などの無線通信技術を使い、パソコンやゲーム機などの無線対応機器は IEEE802.11 [2] の無線 LAN で接続するデバイスである。またテザリングとは、スマートフォンなどの端末を AP として、個人の端末を中継ノード兼端末としてインターネットに接続する機能のことである。このモバイル AP やテザリングの普及は、個人が移動無線 LAN システムを持つことを意味し、多くの無線 LAN システムが一時的にあるいは恒久的に密集することにつながる。

また、無線 LAN の構成自体も変わってきている。従来の固定無線 LAN では、壁や天井に設置された AP に対して、端末は見通し範囲から接続を行うといった構成が前提とされていた。

また、マルチホップ網やアドホック網では、高々数個の AP のみが、キャリアセンス範囲にあるといった前提であり、多数の AP がキャリアセンス内にあるという状況は、それほど考慮されていなかった。

AP と端末の距離も、前述のモバイル AP やテザリングなどでは、高々1m 以内であることが多い(以下、コンパクトという言葉で AP と端末が近くにあることを表現する)。また、AP に接続する端末数も高々数個であろう(これは、端末の仕様の場合もある)。

AP と端末は、お互いに非常に強い信号を受信することができる。このことで、キャプチャエフェクトが強くなり生じることになる。すなわち、他の無線 LAN からの干渉信号は、自無線 LAN の信号に比べて、弱くなる。そのため、3.1 節で説明するように、SINR(Signal to Interference Noise Ratio)が高くなり、無線 LAN 間では、たとえコリジョンが発生しても、受信成功率が高まる。

このように、コンパクトな無線 LAN 同士が近接している場合、無線 LAN 数が増えることによるコリジョンには強いが、後述する Performance Anomaly による性能劣化が 1 つの無線 LAN で起こると、それがすべての無線 LAN の品質を劣化させる。この Performance Anomaly は、適応伝送レート制御に原因がある。

無線 LAN は、後述するように複数の伝送レートをを用いている。端末の電波状況により最適な伝送レートをを用いることで、距離に依らず安定した通信を行うことができる。しかしながら、低伝送レートの端末と高伝送レートの端末が同時に存在すると、CSMA/CA における送信機会の均等性から、著しい性能劣化が引き起こされる現象 (Performance Anomaly) が現れる。単独の無線 LAN においても問題となる、この Performance Anomaly は、複数の無線 LAN が同じ CSMA/CA に参加している場合、すべての無線 LAN に波及するため、さらに大きな問題となる。

従来用いられている適応伝送レート制御は、この Performance Anomaly 問題をさらに深刻化している。従来の適応伝送レート制御は、ARF (Auto Rate Fallback) に代表されるような MAC フレームの送達成功/失敗を計測して伝送レートを決める方法である。しかしながら、コリジョンによる MAC フレームの送達失敗に適応伝送レート制御が反応することで、不要な伝送レートの低下を引き起こし、さらにこれが、Performance Anomaly を引き起こすことになる。一般に、コリジョン確率は、アクティブ端末数が多いほど高くなる。しかしながら、コンパクトな無線 LAN では、前述のように、キャプチャエフェクトなどにより、無線 LAN 間の干渉は、無線 LAN 内の干渉ほど、受信成功率に影響を与えない。すなわち、無線 LAN 内で発生するコリジョンと無線 LAN 間で発生するコリジョンとはそれぞれ、Performance Anomaly を引き起こす貢献度が異なることを意味する。

従って、このような振舞いによる不要な性能劣化を改善するために、複数の近接した無線 LAN における無線 LAN 数およびアクティブ端末数とスループットの関係を明らかにし、改善策

を講じる必要がある。まずは、不要な Performance Anomaly の原因である従来の適応的マルチレート制御 (ARF) の問題点を指摘し、さらにこれに対して、提案する CARC(Context Aware multi-Rate Control) 方式がスループットを向上させることを示す。

2. 従来研究とその課題

適応伝送レート制御についても、すでに多くの研究が行われている。最も有名な ARF を含め、多くの研究 [3] [4] [5] [6] が、端末の MAC フレーム送達の可否をベースに、レートを適応的に上下させるアルゴリズムの提案に費やされている。これら従来の適応レート制御は、大きく 2 つの方式に分けられる。1 つは、MAC フレームの送達成功/失敗をトリガにレートを変更するものである [3] [4] [5] [6]。この方式を採用するレート制御方法には、ARF [3]、AARF(Adaptive Auto Rate Fallback) [7]、Onoe [8]、SampleRate [9] などがある。ARF は、一定回数だけ連続してフレーム送信に成功すると伝送レートを上げ、反対に送信に失敗すると伝送レートを下げる制御を行う。また、この ARF を改良したのが AARF であり、伝送レートを上下させる送信回数の閾値を、その都度調整する。また Onoe は、一定時間ごとに総送信量を計算して、フレームロス率が 50% 以下になる最適な伝送レートを求める制御を行う。SampleRate は、ある期間で、最小の平均伝送時間 (再送やバックオフを含めた、フレームが正しく送られてから ACK が返るまでの時間) のビットレートを伝送レートとしている。もう 1 つは、MAC フレームの送達失敗の原因を見分けることで、コリジョンエラーではなく、SINR 低下による失敗の場合にのみ、レートの変更を行うものである [3] [4] [5] [6]。このレート制御方式には、LD-ARF(Loss Differentiating-ARF) [10]、CARA(Collision-Aware Rate Adaptation) [4]、RRAA(Robust Rate Adaptation Algorithm) [11]、LDRA(Loss Differentiation Rate Adaptation) [12] などがある。LD-ARF は、ヘッダが復号できるかどうかで SINR 低下によるフレームロスか、コリジョンエラーによるフレームロスを判断する。SINR 低下の場合には、受信端末が NACK(Negative ACKnowledgement: 否定応答) を返す。その他は ARF を同じ制御である。CARA はフレームロスが起こった場合に、RTS/CTS フレームを用いる。再送の前に RTS フレームを送り、RTS フレームも無くなるようなら、コリジョンによってデータロスが起こりがちだと判断する。しかしながら、RTS/CTS を使うため、オーバーヘッドが大きくなってしまふ。CARA と同様に、RRAA もフレームロス時に RTS/CTS を用いる。LDRA は、フレームロスの原因を診断して、それを素早く回復する制御である。このロス診断には、SINR に頼っており、特に低い SINR 環境に効果的な制御方法である。後者のようにコリジョンエラーを見分けることで不要なレート低下、ひいては、Performance Anomaly を防止することができる。しかしながら、実際には、本研究での実験を通して、前者の方式を採用している実機が多いように感じる。前述のように、適応レート制御は標準化されておらず、ベンダ (主として MAC チップベンダ) の実装に任されている。後者は、複

雑なアルゴリズムを要求されるため、バッテリー消費に制約のあるポータブルデバイスでは、敬遠されていると思われる。すなわち、単純な方式が求められているが、一方で、Performance Anomaly を防止するような適応レート制御が求められている。

そこで本稿では、単純で、なおかつコリジョンエラーによるレート変更をできるだけ防止するような適応レート制御を提案し、評価する。

3. 従来技術

3.1 ランダムアクセス (CSMA/CA) 方式

CSMA/CA では、多少のランダム性はあるものの端末がそれぞれ同じ基準値を用いて、通信を行うため、送信機会が均等になる。これは、端末も AP も同様である。これが、性能上 2 つの問題を生じる。一つは、送信データを持っている全端末の最大スループットが同一になることである。これは後述の Performance Anomaly を生む。このような送信制御を各端末が自律分散的に行う。各端末の送信が同期して、フレームが同時に送信されてしまうこと (コリジョン) により送信が失敗することをできるだけ避けるために、バックオフ時間はランダムに決める。しかしながら、他の端末と同じタイミングでフレームを送信してしまう場合があり、コリジョンによる送信失敗 (コリジョンエラー) が発生する。失敗には、もう一つの理由があり、それは、ノイズなどが原因で発生する低 SINR (Signal to Interference Noise Ratio) によるビット誤りから来るフレームエラー (ノイズエラーと呼ぶ) である。

近接した多数の無線 LAN において、注意すべき点は、コリジョンが発生することとコリジョンエラーが発生することは、異なることである。CSMA/CA では、お互いにキャリアを検出し、バックオフ時間にランダム値を用いることで、同時送信の可能性を低下させているが、完全にはゼロにすることができず、コリジョンが起こる。コリジョン発生時の受信成功率は、受信側の SINR で決まる。本研究で扱うようなコンパクトな無線 LAN においては、他の無線 LAN から来るノイズ (コリジョンを起こしているフレーム) よりも、自無線 LAN から来る信号のほうが大きいので、SINR が非常に大きくなることが予想され、すなわちキャプチャエフェクトが働き、受信成功確率は、従来研究で想定されている無線 LAN モデルよりも遙かに高くなる。本稿でも、2 つの単語、コリジョンとコリジョンエラー、を明確に使い分けている。SINR が大きい場合には、コリジョンは起こるがコリジョンエラーは発生しない、ということになる。

コリジョンの確率は、このほかに、同時送信する端末数が多いほど高くなる。また、コリジョンエラーの確率も、同時送信する自無線 LAN 端末数あるいは同時送信する他の無線 LAN の端末数が多いほど SINR が低下する。同時送信する他の無線 LAN の端末数がコリジョンエラーを通してスループットに与える影響に関しては、従来研究がほとんど無く、本稿で定量的に評価を行う。

3.2 マルチレートと無線 LAN 規格

さらに、IEEE802.11 の無線 LAN では、ビットエラーレートあるいはフレームエラーレートを適切な値に維持するために、

複数の伝送レートが規定されており、ビットエラー状況に応じて適切な伝送レートが選択可能になっている。この選択アルゴリズムは、標準では規定されておらず、現在はベンダが独自に決定している。各ベンダの選択基準に関しては、詳細は公表されていないが、文献 [3] のような報告が 1 つのリファレンスになっている。これによれば、ARF メカニズムを用いて、劣悪な電波環境により高速な伝送レートを維持できなくなった場合には、低速な伝送レートへ切り替え、電波環境が良好な場合には高い伝送レートへ変更を行うマルチレート制御 (適応レート制御) が行われている。このようなメカニズムにより、環境の異なる複数の端末を効率的に収容することができる。しかしながら、ARF では、電波環境の劣化が原因で伝送レートを低下させるだけでなく、コリジョンエラーが原因の場合に対しても伝送レートを低下させてしまう。そのため、不必要な伝送レート低下を引き起こす可能性がある。コリジョンエラーに対して、伝送レートを低下させることは、さらなるコリジョンエラーを引き起こし、エラーレートを高める可能性はあっても、軽減する可能性はほぼ無い。この不必要なレート低下により、後述の Performance Anomaly が引き起こされることは、大きな性能劣化の主要原因になってしまっており、本研究での検討課題の一つになっている。

3.3 Performance Anomaly

マルチレート無線 LAN 環境では、フレームの受信状況に応じて適切な伝送レートを用いて、フレームを送信する。1 つのキャリアセンスドメイン内において、高伝送レート端末の中に低伝送レート端末が 1 台でも存在すると、全ての端末および AP のスループットが著しく低下する Performance Anomaly と呼ばれる性能劣化現象が生じる。図 1 に Performance Anomaly による性能劣化の様子を示す。低伝送レートの場合、高伝送レートに比べてフレーム送信にかかる時間が長くなる。しかしながら、CSMA/CA では、各無線端末に均等な送信機会が与えられている。このため、低伝送レート端末のフレーム送信終了を、高伝送レート端末が長時間待つことになり、高伝送レートの端末を含む全ての端末のスループットが著しく低下してしまう。なお、このとき、すべての端末が同じスループット値を得る。具体的な数値例を示す。1 つの 802.11g 無線 LAN 内に伝送レートが 54Mbps の端末と 6Mbps の端末が 1 台ずつ存在する場合、端末 1 台あたりのスループットは、おおよそ、各端末の伝送レートの調和平均によって、 $2/(1/54+1/6)=10.8\text{Mbps}$ と求められる。これは、最大容量、すなわち 54Mbps のわずか 20% のスループットしか得られないことを意味する。これが Performance Anomaly による性能劣化である。

3.4 キャプチャエフェクト

キャプチャエフェクトは、近接する多数の無線 LAN の通信性能に多大な影響を及ぼす。キャプチャエフェクトが大きい場合、MAC スループットは向上する。これはコリジョンが発生したときに、本来壊れるかもしれなかった MAC フレームがキャプチャエフェクトにより、正常に受信されるからである。このキャプチャエフェクトは、複数の MAC フレーム送信が同時に行われる場合に、受信強度の強い電力の信号が受信される、つ

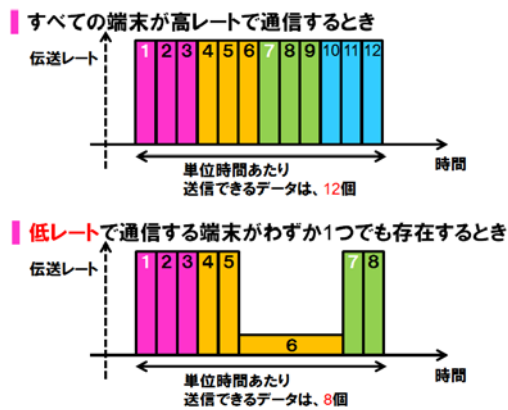


図 1 Performance Anomaly

まり、受信信号電力とその他の電力（受信ノイズの電力）にある程度の差がある場合には、信号が正しく受信されるというメカニズムによる効果である^(注1)。この効果により、実際にはコリジョンが存在してもフレーム送信は成功し、余計な再送やバックオフをもたらさないため、スループットが向上する。

この効果の大きさは、無線 LAN 内と無線 LAN 間とで異なる。無線 LAN 内では、複数の端末送信において、コリジョンが発生しても、最も強い受信信号のものが正しく受信される可能性がある。無線 LAN 間の場合には、LAN 内からの受信電波と LAN 外からのノイズとの差に応じてキャプチャエフェクトが起こる。通常、LAN 内の AP と端末は、LAN 外の端末よりも距離が近いことが多いので、LAN 内の端末から AP に送られた信号は、LAN 外から来る信号よりも強く、その結果、コリジョンが起こっても正しく受信できるというキャプチャエフェクトが得られる。例えば、異なる N セットの無線 LAN の各々 1 台の端末が同時に送信しコリジョンが起きた場合には、それぞれの送信フレーム（つまり N フレーム）が正常にそれぞれの無線 LAN で受信される可能性がある（図 2 参照）。

このように、キャプチャエフェクトは、使用する AP の数と端末の配置の仕方に依存する。AP 数が増加すると、つまり無線 LAN の数が増加すると、より多くの MAC フレームコリジョンの可能性が生じ、それだけ、キャプチャエフェクトが現れる可能性も高まる。また、LAN 内端末が AP に近く設置されるほど、LAN 外端末からの信号が相対的に弱くなりキャプチャエフェクトが高まる。

なお、コリジョンを起こした信号がキャプチャエフェクトによって正しく受信される確率は、受信信号強度、復号デバイス性能、ノイズ信号強度など、様々な要因で決まるため、キャプチャエフェクトを計算機シミュレーションなどでモデル化することは非常に困難であり、実機を用いた計測が必要である。

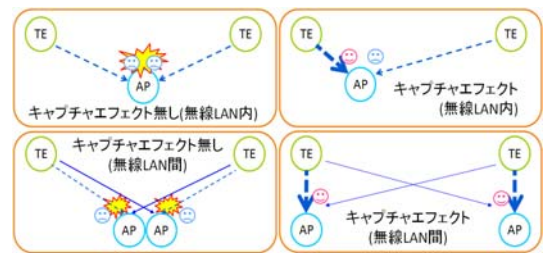


図 2 AP の位置とキャプチャエフェクトの有無

4. コンテキストウェアなレート制御 CARC 方式

4.1 適応レート制御と Performance Anomaly による多数の無線 LAN のスループット低下

次に、伝送レート制御と通信品質について検討する。本研究が対象とする多数の近接した移動無線 LAN では、1 つの無線 LAN 内の 1 つの端末の伝送レート低下が他の無線も含め、全ての無線 LAN の Performance Anomaly も引き起こし、性能劣化に繋がってしまう。

図 3 に MAC フレーム送達時のエラー原因とエラーに対する制御を示す。エラーの原因には、コリジョンと SINR 劣化がある。コリジョンエラーの場合は、バイナリバックオフ制御を、SINR 劣化によるエラーの場合はバックオフに加えてレートを低下させるべきである。しかしながら、エラー時に、このエラー原因を区別することは容易ではない。そのため、エラー回数などの情報を基にしてレートを最適に調整する機能である ARF では、どちらのエラーが発生しても、バイナリバックオフ制御とレートを低下させる制御が同時に行われる。しかしながら、コリジョンエラーの場合、ARF でレートを低下させても、同時送信を防げず、この不必要なレート低下により却って Performance Anomaly を引き起こす。本研究で想定しているような、AP と端末が高々数十 cm といった非常に近距離にある移動無線 LAN の場合、SINR 劣化によるエラーよりもコリジョンエラーが発生する確率のほうが断然高い。コリジョンエラーは、1 つの無線 LAN 内の端末数が多い場合、あるいは他の近接する無線 LAN の端末数が多い場合、増加する。従って、多数の無線 LAN が存在する場合には、Performance Anomaly が引き起こされやすくなる。すなわち、図 4 に示すように、複数台の端末が接続する無線 LAN が多数近接している場合、1 つの無線 LAN 内のある 1 台の端末の伝送レートが低下すると、自無線 LAN 内で Performance Anomaly が発生し、スループットが低下する。さらに、この Performance Anomaly が近隣の他の無線 LAN にも影響を及ぼし、無線 LAN システム全体でスループットが低下してしまう。

図 5 に Performance Anomaly の実測結果を示す。近接する 2 つの無線 LAN に、それぞれ 2 台の端末が接続しており、無線 LAN-1 の端末 1 のみ ARF を用いて、残りの端末は全て伝送レートを 54Mbps に固定している。横軸が時間、縦軸が伝送レートおよび同時刻のスループットである。端末 1 のみ AP が

(注1): 正しく受信される条件には、ここで述べた受信信号電力と受信ノイズの電力の差という条件のほかに、受信デバイスの性能や復号技術の性能などで決まる条件がある。

ら遠ざけると、ARF により伝送レートが低下し、同時にスループットも低下した。このとき、伝送レート固定のため低下しないはずである、同じ無線 LAN 内の端末 2 のスループットも端末 1 と同様に低下した。さらに、近接する無線 LAN-2 の端末 2 台においても、スループットが低下し、無線 LAN 全体のスループットが低下していることを確認した。

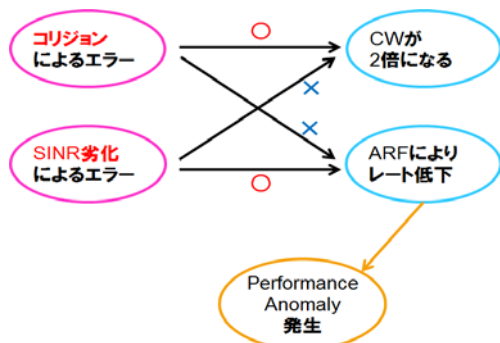


図 3 MAC フレーム送達時のエラー原因とエラーに対する制御

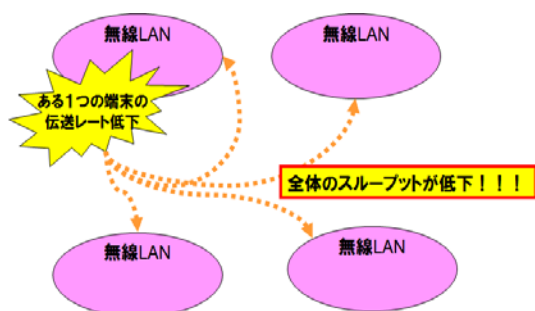


図 4 近接する多数の無線 LAN における Performance Anomaly

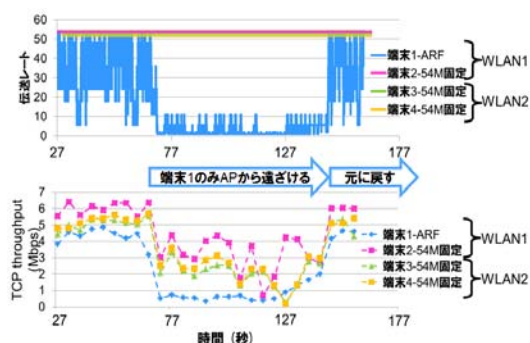


図 5 近接する多数の無線 LAN における Performance Anomaly の実測結果

4.2 コンテキストアウェアな適応レート制御

ARF により引き起こされる Performance Anomaly の問題を回避するため、CARC(Context Aware multi-Rate Control)を提案する。図 6 に示すように、CARC はコンテキストに応じて、ARF と T-ARF(Throughput-based ARF)を使い分ける。コンテキストとは、ユーザの位置や行動状況、周辺環境や状況といったことを意味する。

テザリングやモバイル AP に接続するなど、AP と端末間が

近距離にある場合は、本研究における提案方式である T-ARF を用いる。公衆ホットスポットにある AP に接続するなど、遠距離の場合には、ARF を用いる。T-ARF は、ARF が用いている MAC フレームの送信成功率ではなく、スループット値を基にして伝送レート調整を行う。そのため、スループットに大きな影響が出ないようなコリジョンエラーを無視して、最適な伝送レートを選択することができる。すなわち、Performance Anomaly を回避し、高スループットを達成できる。ただし、スループットを測定できないほど小さなトラフィックの場合は、ARF を用いる。コンテキストには、ノイズエラーの特性が異なる AP-端末間距離と、スループット計測の可否によるトラフィック量との 2 つの属性を用いている。

	トラフィック量	大きなトラフィック	小さなトラフィック (※※)
端末とAPの距離			
近距離: テザリング、モバイルAP		T-ARF(※)	ARF
遠距離: 公衆ホットスポット		ARF	ARF

※スループットレベルのARF
※※計測できないほど小さなスループットの場合

図 6 CARC における ARF 使い分け

4.3 レート制御とスループット

CARC の制御効果を調べるために、4 種類の実験シナリオにて、「端末数」「無線 LAN 間距離」「AP-端末間距離」「ノイズ」の変化に対するスループット変動について、実機(端末: Nexus S, AP: Planex MZK-MF300N (IEEE802.11g))を用いた評価実験を行った。T-ARF における最適な伝送レートの選択制御については、別途論じることとし、本稿では、伝送レート固定の場合に比べて、ARF がどのような特性を示すかを比較した。

図 7 に、AP と端末間が近距離通信かつトラフィック量が多い場合の、無線 LAN あたりの端末数に対するトータルスループット特性を示す。AP と端末間の距離は 5cm とし、1 つの無線 LAN 内に接続する端末数を 1~8 と変化させた。複数無線 LAN の場合には、無線 LAN 間距離を 1m とした。トラフィックは、UDP で uplink 方向に送信させた。無線 LAN あたりの端末数が増えるほど、コリジョンエラーが増加するため、ARF では、レート低下が起こってしまい、Performance Anomaly によりトータルスループットが著しく低下した。一方、54Mbps 固定では、コリジョンエラーが起こってもレートを下げないため、Performance Anomaly を防ぐことができ、トータルスループットは高く、ARF に比べて、約 4 倍も高いスループットを獲得できた。また、無線 LAN 数が増えると、無線 LAN あたりの端末数が同じでも、周辺からの干渉(ノイズ)が大きくなるため、キャプチャエフェクトが弱くなる。そのため、コリジョンエラーが起こりやすくなり、ARF でトータルスループットが低くなった。

伝送レート固定の場合と ARF の場合それぞれに、コリジョンエラーが及ぼす影響を示すため、AP と端末間距離を固定し、

無線 LAN 間距離を変化させた場合の、トータルスループット特性を図 8 に示す。AP と端末間距離は 5cm とした。無線 LAN は 2 セット用いた。無線 LAN あたりの端末数は、自無線 LAN 内ではコリジョンエラーによる Performance Anomaly が起こりにくく、無線 LAN 同士が近づくときに起こりやすいような台数 (今回の設定では 2 台) とした。

まず、レートを 54Mbps 固定にした場合と ARF を比較する。距離比が大きい (無線 LAN 間距離が大きい) 場合は、コリジョンが起きて、キャプチャエフェクトが効くため、コリジョンエラーになりにくい。そのため、どちらも同程度のトータルスループットが得られた。距離比が小さくなる (無線 LAN 間距離が小さくなる) に連れて、キャプチャエフェクトが効かなくなるため、コリジョンエラーが増加する。そのため、ARF ではレートが低下し、Performance Anomaly が発生して、トータルスループットが低下する。54Mbps 固定は ARF に比べて、約 3 倍も高いトータルスループットを獲得できた。次に、固定する伝送レートを低くした場合 (24Mbps) と ARF を比較する。距離比が大きいときには、ARF に比べて、スループットが低くなってしまふ。従って、AP-端末間距離が小さいときには、T-ARF の制御としては 54Mbps 固定が望ましい。

図 9 に、ノイズ環境における ARF とレート固定を比較するため、無線 LAN 間距離を固定し、AP と端末間距離を変化させた場合の、トータルスループット特性を示す。無線 LAN 間距離は干渉が強すぎず、適度な近さである 50cm とした。距離比が大きい (AP と端末間距離が大きい) 状況では、信号とノイズの強度が同じくらいになるので、コリジョンの時にキャプチャエフェクトが効きにくくなるため、コリジョンエラーが増加する。さらに自然ノイズも大きくなるため、SINR も低下する。伝送レートを 54Mbps や 6Mbps に固定した場合は、SINR 低下により、スループットが劣化し、これは伝送レートが高いほど、短距離で起こる。ARF の場合は、SINR 低下に加えて、コリジョンエラーにより、レートを低下させてしまうため、スループットの低下が大きくなる。そのため今回は、54Mbps 固定と ARF は、距離比 = 54 でスループットがほぼゼロになった。同距離で、6Mbps 固定は、スループットがゼロではなかった、つまり ARF よりもスループットが高かったことから、ARF はうまくレートを選択できていなかった、ということができる。すなわち、T-ARF において適度な伝送レートを選ぶことができれば、ノイズ環境でも ARF と同じ性能を得られる可能性がある。

最後に、極めて局所的にノイズ (人工ノイズ) が存在する場合の大きさを変化させ、SINR だけを変化させた場合のスループット特性を調査した。人工ノイズ源には、無線 LAN への干渉の影響が大きいとされている家庭用電子レンジ (東芝 ER-FX1(H)N) を用いた。この電子レンジの発振周波数 (2450MHz) に合わせて、無線 LAN はチャンネル 11 を用いている。無線 LAN を 1 セット用い、接続する端末は 1 台とした。AP と端末は手の届く範囲程度の近距離にあることを想定しているが、至近距離では、キャプチャエフェクトが効いてしまい、電子レンジ程度のノイズに打ち勝ってしまうため、敢えて距離を伸ばした。具体

的には、AP と端末と電子レンジはそれぞれ 2m 程度離し、正三角形を構成した。

図 10 に、電子レンジを稼働させているとき (ノイズあり) と、稼働させていないとき (ノイズなし) の、固定伝送レートに対するスループット特性を ARF の特性と比較して示す。ARF およびすべての伝送レート固定の場合において、電子レンジの影響を受けて、ノイズありの方がスループットが低くなった。さらに伝送レート固定の場合、ノイズに対して適切にレート調整を行わないため、すべての固定伝送レートに比べて、ARF が高いスループットを示した。しかしながら、54Mbps および 48Mbps 固定といった高レートの場合は、ARF に比べて、高々 9~12% のスループット劣化であった。従って、電子レンジのような人工的なノイズが大きい環境でも、T-ARF は、ARF に比べてそれほど性能に遜色はない。以上のことから、多数の移動無線 LAN が存在するような状況における品質の向上には、MAC フレーム単位で伝送レートを変動する ARF ではなく、ある程度固定する T-ARF が有望だと考える。

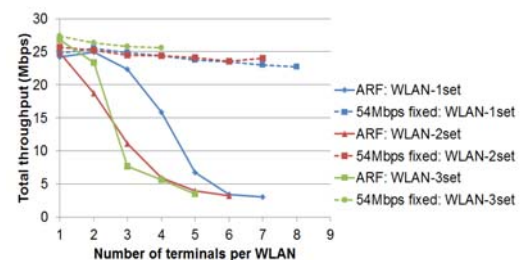


図 7 ARF と T-ARF のスループット比較

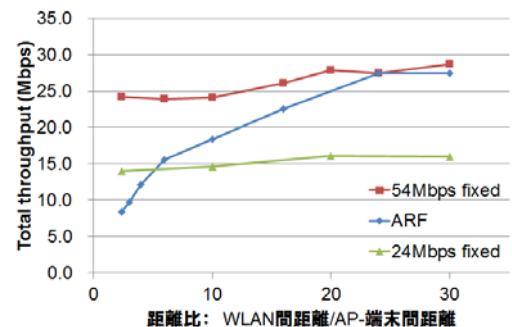


図 8 距離比とスループット (AP-端末間距離固定)

5. おわりに

多くの移動無線 LAN を密集して使う状況が増えることで、これまで想定していなかった干渉の影響が現れ、効率的に電波利用ができなくなり、QoS (Quality of Service: スループット) が低下することが懸念される。

本稿では、伝送レート制御と通信品質について検討した。これまで、1 つの端末の伝送レートの低下により引き起こされる無線 LAN 全体の特に著しい性能劣化 (Performance Anomaly) についてはよく知られていた。しかしながら、本研究が対象とする多数の近接した移動無線 LAN の場合は、1 つの無線 LAN

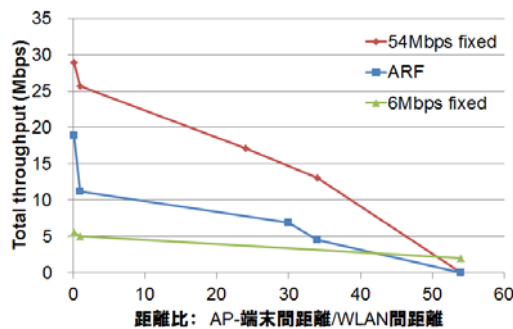


図 9 距離比とスループット (無線 LAN 間距離固定)

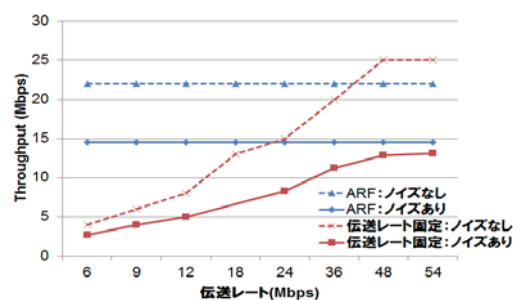


図 10 人工ノイズが存在する場合の伝送レートに対するスループット特性

内の 1 つの端末の伝送レート低下が他の無線も含め、すべての無線 LAN の Performance Anomaly も引き起こし、性能劣化に繋がってしまう。従って、Performance Anomaly 自体を起こさないための工夫が必要である。まず、適応的マルチレート制御 (Auto Rate Fallback, ARF) の問題点を指摘し、さらにこれに対して、提案する CARC (Context Aware multi-Rate Control) 方式がスループットを向上させることを示した。

MAC フレーム送達時のエラー原因には、コリジョンとノイズがあり、それぞれバイナリバックオフ制御と、バックオフに加えてレート低下制御を行うべきである。しかしながら、エラー時に、このエラー原因を区別することは容易ではなく、エラー回数などの情報を基にしてレートを最適に調整する機能である ARF では、どちらのエラーが発生しても、バイナリバックオフ制御とレートを低下させる制御が同時に行われる。しかしながら、コリジョンエラーの場合、ARF でレートを低下させても、同時送信を防げず、この不必要なレート低下により却って Performance Anomaly を引き起こす。そこで、本稿では、これを回避するため、CARC 方式を提案し、制御効果を示した。CARC はコンテキストに応じて、ARF と本研究の提案方式である T-ARF (Throughput-based ARF) を使い分ける。テザリングやモバイル AP に接続するなど、AP と端末間が近距離にある場合は、T-ARF を用いる。公衆ホットスポットにある AP に接続するなど、遠距離の場合には、ARF を用いる。T-ARF は、ARF が用いている MAC フレームの送信成功率ではなく、スループット値を基にして伝送レート調整を行うレート制御手段である。そのため、スループットに大きな影響が出ないようなコリジョンエラーを無視して、最適な伝送レートを選択する

ことができる。ただし、スループットを測定できないほど小さなトラヒックの場合は、ARF を用いる。コンテキストには、ノイズエラーの特性が異なる AP-端末間距離と、スループット計測の可否によるトラヒック量との 2 つの属性を用いた。その結果、提案する CARC は、従来の ARF に比べて、最大で約 4 倍もの性能向上があり、多数の近接した移動無線 LAN が存在する場合に有効であることを実機実験により示した。

文 献

- [1] IETF Working Groups: Mobile Ad-hoc Networks (manet), <http://datatracker.ietf.org/wg/manet/charter/>
- [2] IEEE 802.11: Wireless LAN Medium Access Control (MAC) and Physical Layer (PHY) Specifications, IEEE 802, June 2007.
- [3] A. Kamerman and L. Monteban, "WaveLAN-II: a high-performance wireless LAN for the unlicensed band," Bell Labs Technical Journal, vol.2, no.3, pp.118-133, 1997
- [4] Kim J, Kim S, Choi S, Qiao D, "CARA: Collision-Aware Rate Adaptation for IEEE 802.11 WLANs," IEEE INFOCOM 2006, Barcelona, Spain, Apr. 2006
- [5] Saad Biaz, Shaoen Wu "Rate adaptation algorithms for IEEE 802.11 networks: A survey and comparison," IEEE Symposium on Computers and Communications, Marrakech, pp.130-136, July 2008
- [6] Lacage M, Manshaei M.H, Turletti T, "IEEE 802.11 Rate Adaptation: A Practical Approach," the 7th ACM international Symposium on Modeling Analysis and Simulation of wireless and mobile systems, pp.126-134, 2004
- [7] M. Lacage, M. Manshaei, and T. Turletti, "IEEE 802.11 Rate Adaptation: A Practical Approach," in MSWiM04, 2004, pp.126-134.
- [8] Madwifi, "http://sourceforge.net/projects/madwifi."
- [9] J. C. Bicket, "Bit-rate Selection in Wireless Networks," Master's thesis, Massachusetts Institute of Technology, 2005.
- [10] Qixiang Pang, Victor Leung, and Soung C. Liew, "A Rate Adaptation Algorithm for IEEE 802.11 WLANs Based on MAC-Layer Loss Differentiation," in IEEE BROADNETS 2005 - Broadband Wireless Networking Symposium, Boston, USA, 2005, pp. 709-717.
- [11] S. Wong, H. Yang, S. Lu and V. Bharghavan, "Robust Rate Adaptation for 802.11 Wireless Networks," MobiCom '06, Angeles, California, USA., September 2006, pp. 146-157.
- [12] Saad Biaz and Shaoen Wu, "Loss Differentiated Rate Adaptation in Wireless Networks," WCNC 2008. IEEE WCNC, Mar. 2008.